

VON DER ANALYSE UND DEM MANA- GEMENT VON ENERGIE- UND STOFF- STRÖMEN ZUM ECODESIGN

VERSION 2.0 DEZEMBER 2008

AGID – Analyse et Gestion Intégrées et Durables des Flux de Matières
et d'Énergie en Entreprise

Herausgeber: Enrico BENETTO

Autoren (in alphabetischer Reihenfolge): Enrico BENETTO,
Alexandre BERTRAND, Julien CARTON, Paula HILD, Colin JU-
RY, Mario PLATTES, Mathieu ROUZEYRE, Joëlle WELFRING,
François ZIMMERMANN

Kritische Durchsicht: Pol SCHOSSELER



Project co-financed by
the European Union

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	3
1 Einleitung und Zielsetzungen	5
2 Energie- und Stoffstrommanagement	6
2.1 Zielsetzungen	6
2.2 Methode	6
2.3 Wertschöpfung für das Unternehmen	7
2.4 Beispiel: Stoffstrommanagement von Wolfram	7
2.5 Beispiel: Energierückgewinnung bei der Regenerierung von Katalysatoren	10
3 Exergetische Analyse	12
3.1 Zielsetzungen	12
3.2 Methode	12
3.3 Wertschöpfung für das Unternehmen	14
3.4 Beispiel: Exergetischer Wirkungsgrad der Luffterheizung	15
4 Emergetische Analyse	16
4.1 Zielsetzungen	16
4.2 Methode	17
4.3 Wertschöpfung für das Unternehmen	17
4.4 Beispiel: emergetische Analyse der Biogas-Produktion	17
5 Lebenszyklusanalyse (LCA)	20
5.1 Zielsetzungen	20
5.2 Methode	20
5.3 Wertschöpfung für das Unternehmen	21
5.4 Beispiel: Die Lebenszyklusanalyse des Einsatzes von Biogas für Kraft-Wärme-Kopplung und Transport	22
6 Ecodesign	27
6.1 Zielsetzungen	27
6.2 Methode	27
6.3 Wertschöpfung für das Unternehmen	28
6.4 Beispiel: Ecodesign eines mehrlagigen Biopolymer-Werkstoffs	29
7 Schlussbemerkungen	32
Literaturverzeichnis	33

Abkürzungsverzeichnis

AGID	Analyse et Gestion Intégrées et Durables des Flux de Matières et d'Energie en Entreprise (nachhaltiges Energie- und Stoffstrommanagement in Unternehmen)
BHKW	Blockheizkraftwerk (Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage)
CML	Centrum voor Milieukunde Leiden
Co	Kobalt
COP	Coefficient Of Performance (hier: Leistungszahl)
CRP	Centre de Recherche Publique (Öffentliches Forschungszentrum Luxemburg)
CRTE	Centre de Ressources des Technologies pour l'Environnement (Kompetenzzentrum technischer Umweltschutz Luxemburg)
d.h.	das heißt
EFRE	Europäischer Fonds für Regionale Entwicklung
EGW	Einwohnergleichwert
ETAP	Environmental Technologies Action Plant
FFK	Verfahren zur Fällung, Flockung und Koagulierung
ggf.	gegebenenfalls
i.d.R.	in der Regel
IPP	Integrierte Produktpolitik
ISO	International Standard Organisation
kg	Kilogramm
KMU	kleine und mittelständische Unternehmen
LCA	Lebenszyklusanalyse
LU	Abkürzung für "Luxemburg"
MCESR	Ministère de la Culture de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (LU) (luxemburgisches Ministerium für Kultur, Hochschullehre und Forschung)
MECO	Ministère de l'Économie et du Commerce extérieur (LU) (luxemburgisches Wirtschafts- und Außenhandelsministerium)
MWe	Megawatt elektrisch (elektrische Leistung in Megawatt)
Nm ³	Normkubikmeter
PET	Polyethylen
PLA	Polylactic acid / polylactide (Polylaktische Säure)
ppm	parts per million (Teile von einer Million)
REACH	Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals (europäische Chemikalienverordnung)

ROI	Return on Investment
Σ	Summe
sej	Solar Embodied Joule
S.A.	Société Anonyme (Entspricht der deutschen Bezeichnung AG - Aktiengesellschaft)
TPS	thermoplastische Stärke aus Getreidestroh
VALMAT	Valorisation des Matériaux (Aufwertung von Materialien)
W	Wolfram
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung und Zielsetzungen

AUTOR: ENRICO BENETTO

Im Rahmen des Projektes AGID wurde das Konzept des nachhaltigen Energie- und Stoffstrommanagements in kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU), die ihren Standort im Ziel-2-Gebiet in Luxemburg haben, eingeführt und weiterentwickeln.

Dabei kamen im Rahmen komplexer industrieller Fragestellungen und/oder Unterprojekten verschiedene Methoden und Instrumente zum Einsatz bzw. wurden hierfür entwickelt. Die detaillierten Ergebnisse sind in den Abschlussberichten der jeweiligen Beratungsaufträge und Forschungsvorhaben dargelegt. Die Verbesserung der Umweltleistungen von Produkten und industriellen Verfahren impliziert jedoch methodische Ansätze und Instrumente, die auf sehr unterschiedliche Fragestellungen eingehen und sich in drei Kategorien einteilen lassen:

- Wie können Energie- und Rohstoffverbrauch sowie Abfallaufkommen verringert werden? Wie können geschlossene Kreisläufe identifiziert und gefördert werden? Wie lassen sich Verluste zurückverfolgen?
- Wie lässt sich die Effizienz (auch unter Umweltaspekten) eines Produktionssystems bewerten?
- Wie lassen sich die Umweltauswirkungen durch ein Produkt oder ein Verfahren bewerten?

Diese drei grundlegenden Fragekategorien sind anwendbar auf:

- Eine Phase des Lebenszyklus eines Produktes oder eines Verfahrens, im Allgemeinen die Produktionsphase bei ersterem und die Betriebsphase bei letzterem,
- Auf den gesamten Lebenszyklus des Produktes oder des Verfahrens, einschließlich der Entwurfsphase.

Oggleich dieser erste hier vorliegende Versuch zur Strukturierung der Problematik bei weitem nicht erschöpfend und durchgehend konsequent ausgearbeitet wurde, erlaubt er dennoch, die verschiedenen vom CRTE bei Beratungsaufträgen und Forschungsprojekten eingesetzten methodischen Ansätze in Bezug auf ihre Zielsetzungen und Anwendungsgrenzen einzuschätzen. Weiterhin gestattet er eine einheitliche Betrachtungsweise der untersuchten Problematiken und der erzielten Ergebnisse.

Ausgehend von der erläuterten Strukturierung besteht das Ziel dieses Berichtes darin, einzelne Werkzeuge und Techniken vorzustellen, wobei ihre jeweiligen Zielsetzungen, die Anwendungsmethode und die Wertschöpfung für das Unternehmen dargelegt werden. Darüber hinaus wird für jedes Werkzeug ein Anwendungsfall präsentiert. Dadurch werden implizit auch die Aspekte herausgearbeitet, deren weitere Erforschung im Rahmen der Fortsetzung des AGID-Projekts sinnvoll bzw. erforderlich erscheint.

2 Energie- und Stoffstrommanagement

Autoren: ENRICO BENETTO (§2.1, §2.2, §2.3)

ALEXANDRE BERTRAND, MARIO PLATTES, JOËLLE WELFRING, FRANÇOIS ZIMMERMANN (§2.4)

ENRICO BENETTO, ALEXANDRE BERTRAND, MATHIEU ROUZEYRE (§2.5)

2.1 Zielsetzungen

Die Energie- und Stoffstromanalyse umfasst die Bilanz der Energie- und Stoffströme innerhalb eines eingegrenzten Systems (z.B. ein Gebiet, ein Unternehmen, ein Verfahren) und über einen festgelegten Zeitraum zu erstellen. Im Allgemeinen wird eine Energie- und Stoffstromanalyse vor dem Hintergrund durchgeführt, Ansätze zur Verbesserung der Leistungen innerhalb des untersuchten Systems oder öko-industrielle Synergien beim Austausch der Ströme (Abfälle, Energie, usw.) zwischen den Wirtschaftsakteuren herauszuarbeiten. Die Verbesserung der Leistungen kann sich dabei in einem verringerten Energie- und/oder Rohstoffverbrauch, einer besseren Abfallwirtschaft, einer Produktivitätssteigerung usw. niederschlagen. Die Suche nach Synergien erfordert indes eine gründlichere Untersuchung des Mutualisierungs- oder Optimierungspotentials der Energie- und Stoffströme in Abhängigkeit von ihren spezifischen Merkmalen.

2.2 Methode

Eine Energie- und Stoffstromanalyse wird im Allgemeinen in Form einer graphischen Darstellung und einer Bilanzierung der Zahlen des untersuchten Systems umgesetzt. Hierzu werden die Energie- und Stoffströme mittels eines (vereinfachten) Modells des Systems quantifiziert, das mit Hilfe einer Software erstellt wird. Im Rahmen des Projektes AGID, kam die Software Umberto^{®1} zum Einsatz.

Der Aufbau des Modells erfolgt anhand der einzelnen Abläufe, die in der Summe das System bilden. Im Fall eines Unternehmens beispielsweise impliziert dies die Quantifizierung und Abbildung der Ströme eines jeden betroffenen Prozesses (Abbildung 1):

- den Stoffströmen: Rohstoffverbrauch, Schadstoffausstoß, Abwasser und Feststoffabfälle,
- den Energieströmen: Verbrauchsmengen an Wärme und elektrischer Energie.

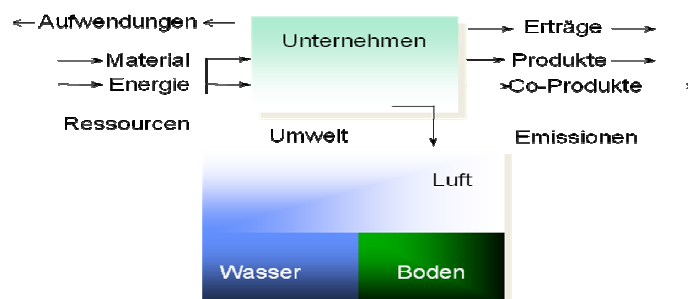


Abbildung 1: Im Allgemeinen bei einer Energie- und Stoffstromanalyse betrachtete stoffliche, energetische und monetäre Ströme

¹ www.umberto.de

Es ist häufig festzustellen, dass der Abfallbegriff subjektiv gefärbt ist, da jeder Abfall potenziell eine Ressource für ein Drittunternehmen darstellen kann. So kann beispielsweise der von einem Unternehmen ausgestoßene Wasserdampf (Abfall) zum Heizen eines anderen Unternehmens dienen (Ressource).

Die monetären Ströme (Erträge und Aufwendungen) werden häufig quantifiziert, da sie eng mit den Energie- und Stoffströmen zusammenhängen. Eine Energie- und Stoffstromanalyse erweist sich jedoch als sehr viel aussagekräftiger als lediglich eine Analyse der monetären Ströme, die von fälschlichen Hypothesen ausgehen kann, wie zum Beispiel: Luft kostet nichts, Wasser ist ein unbegrenztes Gut, die Ökosysteme haben eine unbegrenzte Selbstreinigungskapazität, unter den Grenzwerten liegende Emissionen sind gefahrlos, usw.

Wenn die Energie- und Stoffströme quantifiziert und abgebildet sind, wird nach Verbesserungslösungen gesucht, um ein genau auf den Unternehmensbedarf abgestimmtes Energie- und Stoffstrommanagement zu entwickeln, so dass unnötige Verluste vermieden werden. Diese Lösungen werden im nächsten Schritt einem Vergleich nach Kriterien wie technische Machbarkeit, Kosten-Nutzen-Analyse und Umweltverträglichkeit unterzogen.

Die Energie- und Stoffstromanalyse ermöglicht:

- Abbildung und Management der Energie- und Stoffströme in verschiedenen Maßstäben (vom Einzelablauf eines Prozesses bis hin zum gesamten Prozesslebenszyklus),
- optimale Lösungen für das Energie- und Stoffstrommanagement,
- eine technisch-wirtschaftliche und umwelttechnische Analyse der in Betracht gezogenen Lösungen.

Mit den gewählten Lösungen können die Umweltbelastungen des untersuchten Systems verringert werden. Die Energie- und Stoffstromanalyse ist jedoch keine allumfassende Bewertung der Umweltauswirkungen.

2.3 Wertschöpfung für das Unternehmen

Die Ergebnisse einer Energie- und Stoffstromanalyse nach obenstehender Darstellung erlauben dem Unternehmen:

- zuvor unbekannte bzw. unterschätzte Stoff- und Energieverluste zu identifizieren,
- den Energie- und/oder Rohstoffverbrauch sowie die damit verbundenen Kosten zu senken,
- die wirtschaftlich maßgebenden Ströme zu identifizieren, eine ganzheitliche Sichtweise dieser Prozesse insbesondere die Identifizierung potenzieller Synergien (Stoff- oder Energieaustausch) zwischen den Prozessen, die zuvor nicht klar erkennbar waren.

2.4 Beispiel: Stoffstrommanagement von Wolfram

Cerazit S.A. ist weltweit führend in der Herstellung von Produkten aus Hartmetallen für den Automobilssektor, den Maschinenbau, die Erdölindustrie, usw. Bei der Herstellung von Produkten auf Basis von Wolframkarbid und Kobalt in Pulverform fallen Ab-

wässer mit einem hohen Schwermetallgehalt an, insbesondere Wolfram (W) und Kobalt (Co), die in unterschiedlichen chemischen Speziationen auftreten. Die vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerte von 2 ppm für W et 0,5 ppm für Co sind sehr streng und wurden auferlegt, um die negative Wirkung dieser Metalle auf die Bakterienflora der Kläranlagen in Schranken zu halten. Grundsätzlich ist auch die Menge der in die Kanalisation eingeleiteten Abwässer zu verringern.

Auf Grundlage der im Abwasser enthaltenen Wolframmenge (Höchstwert 720 ppm), wurde ein Verfahren zur Fällung, Flockung und Koagulierung - FFK - durch Eisen (III) -Chlorid einer Stoffstromanalyse unterzogen. Mit Hilfe der Software Umberto[®] wurde ein Prozessmodell erstellt. Dabei sind die entsprechend berechneten Abwasserströme sowie die Co- und W-Ströme jeweils durch die Sankey-Diagramme von Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellt. In diesen Diagrammen stellen die Quadrate (T1, T2, ...) Reaktionen, einzelne Prozessschritte, Umwandlungen von Stoffen und/oder Energie dar. Die Kreise (P1, P2, ...) können entweder den Input (Stoff und Energie, grün) oder den Output (rot) darstellen oder als Bindeglied zwischen zwei Übergängen fungieren (grau).

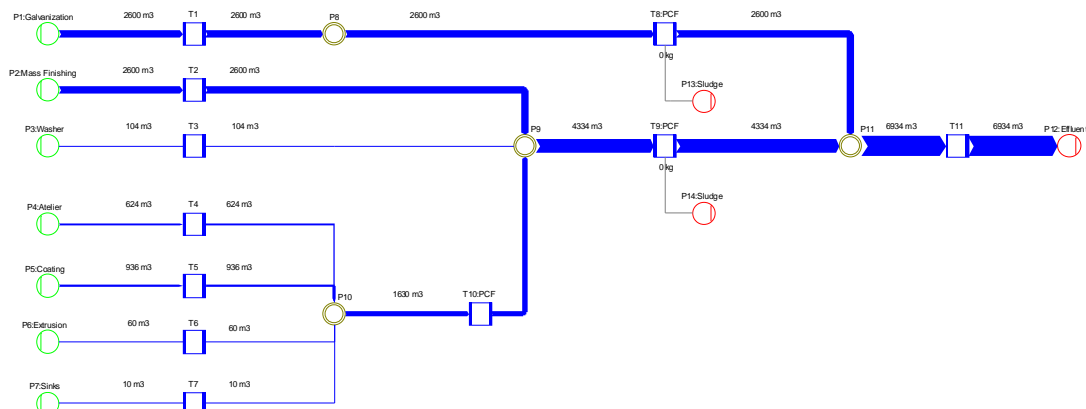


Abbildung 2: Abwasserströme [m³ pro Jahr]

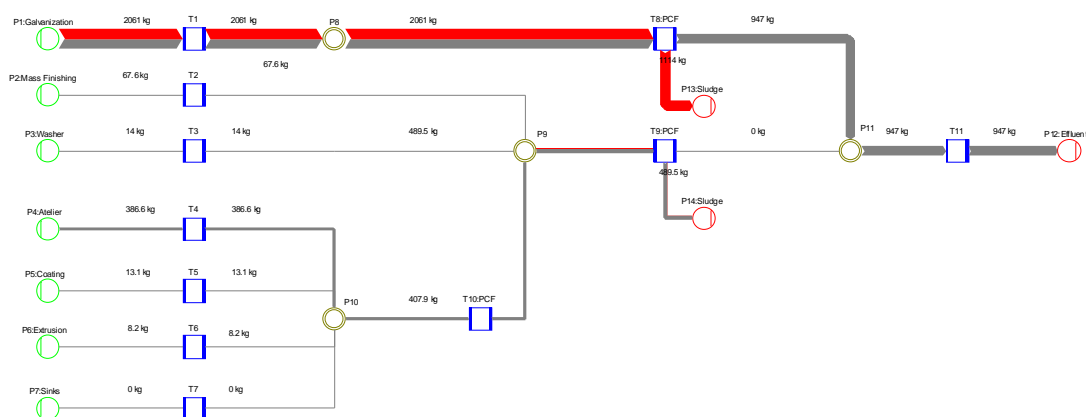


Abbildung 3: Ursprüngliche Wolframströme (grau) und Kobaltströme (rot) in [kg pro Jahr]

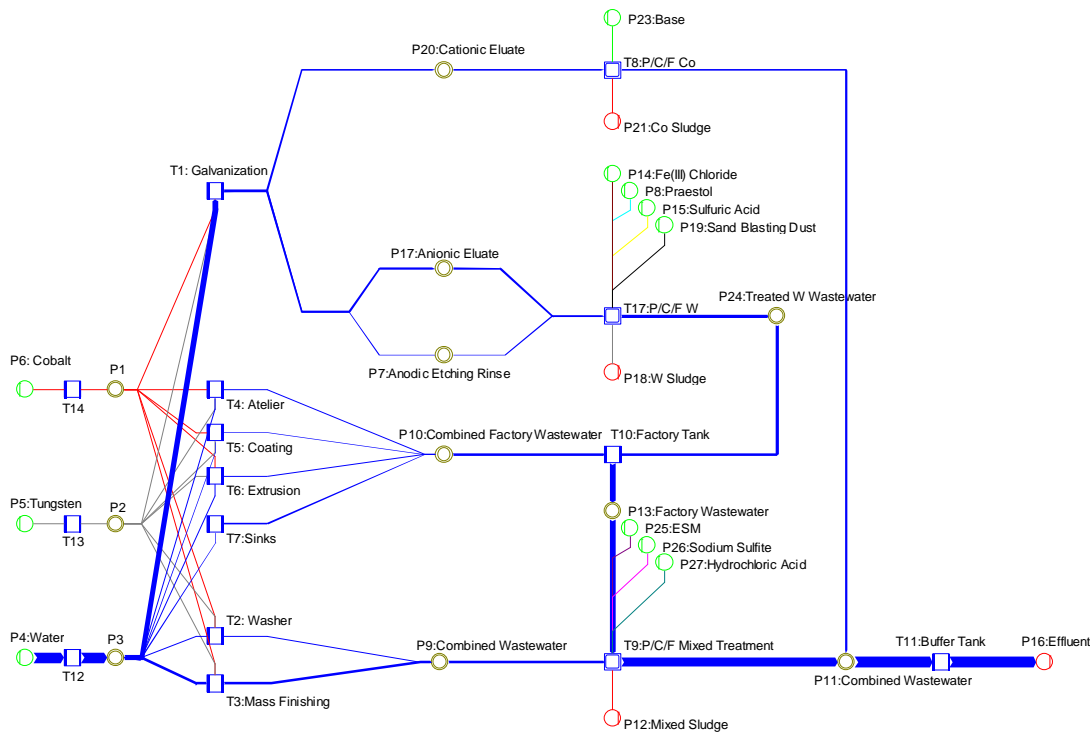


Abbildung 4: Stoffströme nach Einführung der Abwasseraufbereitung durch Fällung/Flockung/Koagulierung

Der größte Stoffstrom sämtlicher Abwasserquellen (P1-P7) entstammt der Galvanisierungsanlage (P1). Die Abwässer aus dieser Anlage werden mit den anderen Wasserströmen des Standortes verdünnt und der wolframhaltige Abwasserstrom wird nicht weiter aufbereitet. Der Wolframgehalt im so zusammengeführten Endabwasser wird auf 135 ppm geschätzt, d.h. ein Wert, der den Normgrenzwert von 2 ppm deutlich überschreitet.

Nach der Optimierung werden die anionischen und kationischen Abwasserströme der Galvanisierung künftig in zwei getrennten FFK-Aufbereitungsstufen behandelt (Abbildung 4: T8 und T17). In einem dritten FFK-Aufbereitungsverfahren (T9) können die restlichen Abwässer behandelt werden. Für diese Verfahren wurden Modelle für untergeordnete Stoffstromnetze entwickelt, die die Zugabe der erforderlichen chemischen Produkte (Flockungsmittel, saure und basische Lösungen) berücksichtigen. Die Aufbereitung des Co-haltigen kationischen Eluats erfordert die Zugabe einer basischen Lösung (P23).

Nach der Aufbereitung des anionischen Eluats beträgt die restliche Wolframkonzentration im Abwasser am Ende der Prozesskette unter 10 ppm, während die Co-Konzentration unverändert bleibt. Der vorgeschriebene Grenzwert von 2 ppm kann aufgrund technologischer Beschränkungen nicht erreicht werden. Immerhin ermöglicht das Aufbereitungssystem jedoch eine Verringerung des W-Ausstoßes um 97 %.

Die Verfeinerung und die Kontrolle des Systems können zu einem späteren Zeitpunkt weiter optimiert werden, um den Restgehalt an Wolfram zu stabilisieren und die Abwassermenge zu verringern. Die Analyse der abwasserproduzierenden Prozesse und die Entwicklung von Ansätzen und Technologien für eine umweltfreundliche Produktion können dazu beitragen, die Emissionen und die damit einhergehenden Umweltbelastungen weiter zu begrenzen.

2.5 Beispiel: Energierückgewinnung bei der Regenerierung von Katalysatoren

Catalyst Recovery Europe S.A. ist ein führendes Unternehmen in der Regenerierung von Katalysatoren aus der petrochemischen Industrie. Der Regenerierungsprozess (Abbildung 5) umfasst zwei Reaktoren, den "Opticat" und den Regenerator. Im ersten Reaktor wird der Katalysator mit vorerwärmter Luft beaufschlagt, um das Wasser und die Kohlenwasserstoffe zu verdampfen und den Oxidationsvorgang des Kohlenstoffs und des Schwefels in Gang zu setzen. Danach werden die Kohlenwasserstoffe mit Hilfe der Brenner oxydiert. Die Oxidation von C und S wird im Regenerator abgeschlossen. Die Rauchgase aus den beiden Reaktoren werden anschließend in einer Nachbrennkammer behandelt um die Oxidation der eventuell noch vorhandenen organischen Reststoffe abzuschließen. Danach werden die Rauchgase in einem Kühlturm auf 220°C herunter gekühlt bevor sie in einem Schlauchfilter (Staubabscheidung) und einem Wäscher (Abscheidung und Oxidation von SO₂) nachbehandelt werden.

Dieser Prozess verursacht durch die Brenner einen sehr hohen Verbrauch an Erdgas (ca. 200 Nm³/h), an Kühlwasser (1 m³/h) und ist folglich mit entsprechend hohen Kosten und Umweltauswirkungen verbunden.

Anhand der Energiestromanalyse sollen die Umweltauswirkungen (gemäß dem Umweltmanagementsystem nach ISO 14001) durch die Reduzierung des Erdgas- und Wasserverbrauchs bei gleichzeitiger Senkung der Betriebskosten verringert werden.

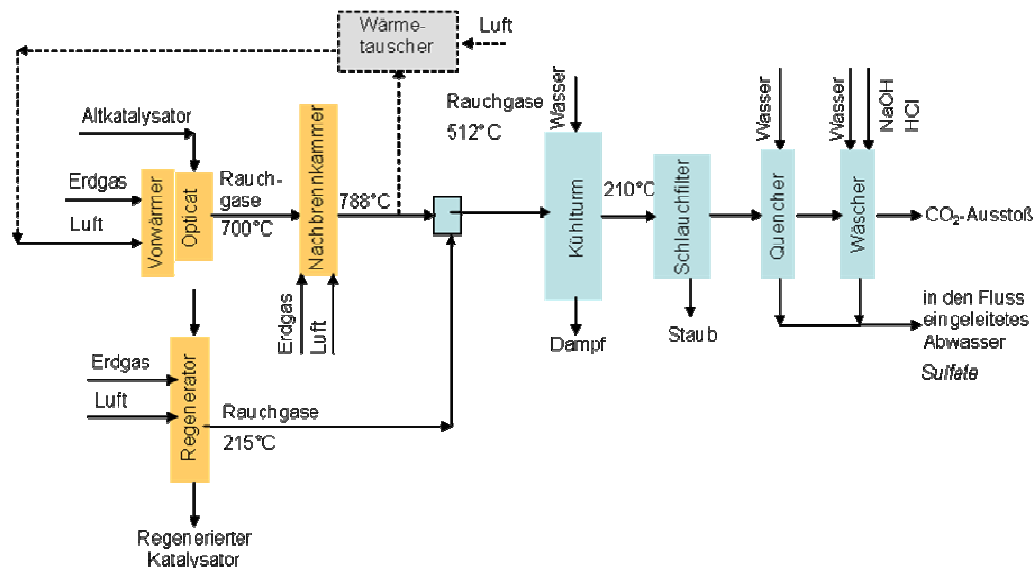


Abbildung 5: Prozess der Regenerierung von Katalysatoren mit Energierückgewinnung (gestrichelte Linie)

Durch die Analyse konnten die Prozessenergieströme ermittelt und eine Lösung zur Wärmerückgewinnung mittels eines Wärmetauschers entwickelt werden. Dieser Wärmetauscher befindet sich am Austritt der Nachbrennkammer und nutzt die Wärme der Rauchgase zur Vorerwärmung der dem Opticat zugeführten Prozessluft.

Die so rückgewonnene Leistung beträgt 518 kW, was 58% der gesamten potenziell rückgewinnbaren Leistung (890 kW) darstellt, die anhand der Energiestromanalyse berechnet wurde. Diese Energieeinsparung entspricht einer Verringerung des Erdgasverbrauchs um 52,2 kg/h (440.000 Nm³/a), welcher ohne Wärmetauscher bei 183,6 kg/h und mit Wärmetauscher bei 131,4 kg/h liegt. Die im Kühlturm eingesparte Wassermenge (aufgrund der niedrigeren Temperatur der zu kühlenden Gase)

beträgt 3.310 m³/a. Die Kosten-Nutzen-Analyse ergibt somit über 500 000 Euro Einsparungen, die im Zeitraum 2006 bis 2008 erzielt wurden, was einem Return on Investment (ROI) von zweieinhalb Jahren entspricht.

Die Umweltbewertung (mittels einer vereinfachten Lebenszyklusanalyse) ermöglicht es, die Reduzierung der Umweltauswirkungen durch den Schadstoffausstoß (der Erdgasverbrennung) an dem Industriestandort mit 910 t CO₂-Äquivalent/Jahr anzunehmen, was 16 % des durch den Prozess verursachten Treibhauseffekts entspricht.

Die Verringerung der Umweltauswirkungen über den Lebensweg, die in Verbindung mit der Bereitstellung des Erdgases (einschließlich Erdgasgewinnung, Import, usw.) stehen, beträgt 1.130 t CO₂-Äquivalent/Jahr, was der Umweltbelastung von 90 durchschnittlichen europäischen Personen (Einwohnergleichwert) über eine Dauer von 1 Jahr entspricht.

3 Exergetische Analyse

Autor: ALEXANDRE BERTRAND

„Thermodynamics is a funny subject. The first time you go through it, you don't understand it at all. The second time you go through it, you think you understand it, except for one or two small points. The third time you go through it, you know you don't understand it, but by that time you are so used to it, it doesn't bother you anymore“.

-Arnold Sommerfeld- deutscher Physiker, verbesserte das Atommodell von Niels Bohr.

3.1 Zielsetzungen

Wie am Beispiel der Analyse und des Managements der Energieströme veranschaulicht, kann der Energieverbrauch ein signifikanter Indikator für die Leistung eines Verfahrens sein. Im Allgemeinen lässt sich so die Energieeffizienz durch die Gegenüberstellung zwischen gewonnener Nutzenergie und verbrauchter Energie berechnen. Von Interesse ist diese Methode aufgrund ihrer Einfachheit und leichten Verständlichkeit. Sie hat jedoch den Nachteil, den qualitativen Aspekt der Energieflüsse nicht widerzuspiegeln. So werden die verschiedenen Arten (Elektrizität, Dampf, Warmwasser, Kaltwasser, Druckluft, usw.) bei der Analyse dieser Ströme getrennt betrachtet, da sie offensichtlich keine gemeinsame Schnittstelle haben². Die Optimierung erfolgt ausschließlich an getrennten Energieströmen, was der Entwicklung einer integrierten Lösung zur wirkungsvollen Optimierung sämtlicher Energieströme des betrachteten Standortes im Wege steht. Darüber hinaus erlaubt die Energieflussanalyse zwar die Berechnung der Wirkungsgrade, wobei diese jedoch keine Hinweise über die Irreversibilität (die Verluste verursacht) des betrachteten Verfahrens liefern.

Eine Möglichkeit diesen qualitativen Aspekt miteinzubeziehen ist, anstelle einer energetischen, eine exergetische Betrachtung durchzuführen. Die Exergie ist der "nutzbare" Teil der Energie und ihre Vernichtung spiegelt die Irreversibilität des betrachteten Systems wieder (und somit das erreichte Niveau bezogen auf den Idealzustand). Die Exergie eines Energieflusses ist als maximale Nutzarbeit eines Systems definiert, die unter Referenzbedingungen (z.B. Temperatur, Druck des Stromes bezogen auf die Umgebungsbedingungen, usw.) erreicht werden kann. Durch das Exergiekonzept als Analysewerkzeug kann ein korrekterer Vergleich zwischen den verschiedenen Energieflüssen erzielt sowie der Irreversibilitätsgrad eines einzelnen Verfahrens erfasst werden [1].

3.2 Methode

Obwohl die Exergie nicht erhalten bleibt (im Gegensatz zur Energie), ist für die exergetische Analyse die gleiche Herangehensweise wie für eine Stoffstromanalyse möglich, d.h. die Summe der Outputströme ist gleich der Summe der Inputströme:

² Ein klassisches Beispiel für diese Schwierigkeit ist die Kompressionskältetechnik. Die Leistung des Systems wird anhand des Verhältnisses zwischen erzeugter Kälte und Stromverbrauch berechnet. Die erzielten Werte (der Begriff Wirkungsgrad wird richtigerweise vermieden, ihm wird der Begriff Coefficient Of Performance - COP – Leistungszahl vorgezogen) liegen im Allgemeinen zwischen 300 und 400 %.

$$\sum \dot{E}x_{in} = \sum (\dot{E}x_{out} + \dot{E}x_{loss}) \quad [\text{kW}]$$

So setzen sich exergetische Outputströme stets (es sei denn im Falle reversibler theoretischer Modelle) aus "Nutzströmen" $\dot{E}x_{out}$ und aus nicht nutzbaren Strömen $\dot{E}x_{loss}$ zusammen. Je höher die exergetischen Verluste sind, desto mehr stellt das System die Ursache von Irreversibilitäten dar und folglich nähert sich das System umso weniger seinem idealen Modell an. Die Optimierung des Systems müsste folglich darauf abzielen, diese Irreversibilitäten zu minimieren, so dass das Verhältnis $\dot{E}x_{out}$ zu $\dot{E}x_{in}$ gegen 1 strebt.

Die allgemeinen Ströme $\dot{E}x_{in}$ und $\dot{E}x_{out}$ umfassen häufig mehrere spezifische Exergieströme. Letztere sind vom betrachteten System abhängig und können je nach den vorliegenden Verhältnissen oder ihrer Bedeutung vernachlässigt werden. Um eine korrekte Analyse zu erhalten, erweist es sich daher als unumgänglich, vor Beginn der Untersuchungsphase, die verschiedenen zu betrachtenden Formen der Exergie, zu definieren.

Die bei den klassischen Verfahren am häufigsten angetroffenen Formen sind:

- Die thermomechanische Exergie $\dot{E}x_{tm}$, welche die Schwankung der Enthalpie ($h-h_0$) und der Entropie ($s-s_0$) berücksichtigt, ist durch die Temperatur und den Druck des betrachteten Mediums festgelegt. Der Index 0 bezieht sich auf den Bezugswert, im allgemeinen die Umgebungsbedingungen (298,15 K ; 1,01325 bar)³

$$\dot{E}x_{tm} = \sum \dot{m}((h-h_0) - T_0(s-s_0)) \quad [\text{kW}]$$

Eine der Hauptschwierigkeiten bei der Berechnung der thermomechanischen Exergie besteht in der Anwendung auf reale Medien sowie auf Mischungen realer Medien, deren Enthalpie- und Entropiewerte unbekannt sind. Die Werte von s und h werden von der Gratissoftware "Coolpack"⁴ zur Verfügung gestellt.

- Die chemische Exergie $\dot{E}x_{ch}$, welche die Exergie einer chemischen Reaktion widerspiegelt. Die Berechnung der chemischen Exergie wird in der Fachliteratur nicht eindeutig definiert. Je nach betrachteter Literaturquelle kann auch die Mischungsexergie bei diesem Wert mitberücksichtigt werden.

Zu diesen Exergiearten kommen die potenzielle Exergie (mit einem Höhenunterschied verbunden) und die kinetische Exergie (in Verbindung mit einem Geschwindigkeitsunterschied) hinzu, die im Vergleich zu den beiden zuerst genannten Strömen und gegenüber der elektrischen Exergie (die der elektrischen Energie entspricht), der nuklearen Exergie usw. häufig vernachlässigt werden können. Wenn die verschiedenen Ströme zur Berechnung der gesamten Ströme $\dot{E}x_{in}$ und $\dot{E}x_{out}$ bestimmt sind, kann der exergetische Wirkungsgrad ermittelt werden:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{out}}{\dot{E}x_{in}} \quad [\text{kW}]$$

³ für ausführlichere Angaben zur Wahl der Referenzbedingungen, siehe [2], S. 29

⁴ <http://www.et.web.mek.dtu.dk/Coolpack/UK/>

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass es mehrere Verfahren zur Berechnung des exergetischen Wirkungsgrades gibt, die entweder effektiv genutzten Energieströme oder genutzte und nicht genutzte Energieströme usw. in Ansatz bringen ([2], p.14). Je mehr sich der exergetische Wirkungsgrad 100 % annähert, desto geringer sind die Irreversibilitäten (und folglich die Verluste) des Systems.

Bei exergetischen Berechnungen sind bestimmte Aspekte mit Sorgfalt zu beachten:

- Die Berechnung des exergetischen Wirkungsgrades kann verfälscht werden, wenn unveränderte Exergieströme berücksichtigt werden. Wenn nämlich der Unterschied zwischen Inputstrom und Outputstrom bezogen auf diese unveränderten Ströme gering ist, so verändert sich der Wirkungsgrad nur sehr geringfügig bzw. gar nicht, was zu Fehlschlüssen führt.
- Reale Medien verhalten sich nicht mehr als ideales Medium wenn ihr Druck zu hoch oder ihre Temperatur zu niedrig ist. Eine Möglichkeit, ihr Verhalten zu prüfen, besteht darin, den Realgasfaktor Z zu berechnen. Letzterer strebt bei idealen Medien gegen 1.
- Die exergetische Analyse eines Verfahrens muss ggf. in mehrere Teile untergliedert werden. Bei der Verbrennung eines Gases beispielsweise ist zunächst der Exergieverlust in Folge der Vermischung von Luft und Brennstoff zu berücksichtigen, um erst danach die Verbrennungsreaktion zu untersuchen. Ein Analysebeispiel für ein BHKW wird von [2] S. 270 ausgeführt.

3.3 Wertschöpfung für das Unternehmen

Durch die exergetische Analyse können die Energieströme unter Berücksichtigung ihrer Qualität sowie der Irreversibilität der betrachteten Verfahren optimiert werden. Anhand der Lösungsvorschläge können Energieströme verschiedener Formen hinsichtlich ihrer Qualität verglichen und so der am besten geeignetste ausgewählt werden, d.h. derjenige, der den erforderlichen exergetischen Wert besitzt und einen geringen Grad der Irreversibilität aufweist. All dies schlägt sich in Form optimierter Geldanlagen, herabgesetzter Betriebskosten und weiterhin geminderter Umweltbelastungen nieder.

3.4 Beispiel: Exergetischer Wirkungsgrad der Luftherhitzung

Betrachten wir den Fall einer Elektroheizung, die zur Erhitzung eines Luftstroms von 100 kg/s von 25°C auf 200°C zum Einsatz kommt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Thermodynamische Daten des Luftstroms

Luftfördermenge	100 kg/s
Enthalpie vor dem Erwärmen	527,15 kJ/kg
Enthalpie nach dem Erwärmen	704,93 kJ/kg
Entropie vor dem Erwärmen	3,94 kJ/kg*K
Entropie nach dem Erwärmen	4,41 kJ/kg*K
Wirkungsgrad des elektrischen Systems	100%
Heizenergie	4,94 kWh
Exergie des Inputstroms	0,00 kWh
Exergie des elektrischen Stroms	4,94 kWh
Exergie des erwärmten Luftstroms	1,06 kWh
Vernichtung von Exergie	3,88 kWh
Exergetischer Wirkungsgrad	21%

Selbst wenn man von einem Wirkungsgrad von 100 % beim Heizungssystem ausgeht, so ergibt die Exergiestromanalyse einen exergetischen Wirkungsgrad im Bereich von 21 %. Daraus ist zu folgern, dass es sinnvoller ist, den elektrischen Energiestrom direkt zu nutzen als ihn zur Erzeugung von Heißluft einzusetzen. Mit anderen Worten: Der Heißluftstrom könnte nur 21 % der theoretischen Arbeit des elektrischen Energiestroms erbringen.

4 Emergetische Analyse

Autor: COLIN JURY

4.1 Zielsetzungen

Verglichen mit der energetischen und exergetischen Analyse erweitert die emergetische Analyse das Spektrum der Studie und berücksichtigt auch die durch natürliche Prozesse zur Bereitstellung der verbrauchten Primärressourcen (Wasser, Erdöl, Erz, Holz, usw.) aufgebrauchte Energie. So erscheint es logisch, bei einem kunststoffverarbeitenden Prozess auch die Energie zur Kunststoffproduktion mit einzubeziehen. Bei der Betrachtung einer natürlichen Ressource ist es daher folgerichtig, die Endenergie mit einzubeziehen, welche die Umwelt zur Bereitstellung der Ressource aufgebracht hat.

Die emergetische Analyse ermöglicht so, den Einsatz bestimmter Ressourcen zu bewerten, etwa die Wasserressourcen oder organische Bodenbestandteile, die zurzeit durch andere Methoden nur schwierig zu berücksichtigen sind. [3]

Ein weiterer Vorteil der emergetischen Analyse, ist der Einbezug wirtschaftlicher Wechselbeziehungen in die Bewertung. In diesem Bereich besteht noch Forschungsbedarf. In unserer Gesellschaft ist es möglich, das Geld in einen Zusammenhang mit einer Umweltbelastung zu stellen, da es unmittelbar mit dem Verbrauch von Ressourcen in Zusammenhang steht, wodurch die Umweltbelastung hervorgerufen wird. [4] Da auch der Angestellte ein Teil des Gesamtsystems ist, muss seine Energie in die Bilanz einfließen. Dies könnte mittels der Energie seines Gehalts erfolgen, welches seinen Konsum und somit die Inanspruchnahme der natürlichen Systeme widerspiegelt, und dem Menschen erlaubt und ihn dazu motiviert, eine Arbeitsleistung zu erbringen.

Es liegt auf der Hand, dass die emergetische Analyse mehrere interessante Aspekte aufweist, von denen einige noch zu erforschen sind. Der Hauptvorteil dieser Methode liegt jedoch in der Tatsache, dass der nachhaltige Charakter (oder die Effizienz) des untersuchten Systems nicht mehr durch subjektive Faktoren menschlicher Handlungsanlässe bestimmt wird, wie es bei der exergetischen Analyse der Fall ist, bei der von Nutzenergie die Rede ist. Ganz im Gegenteil dazu ist der unumgängliche Hauptfaktor, der beleuchtet wird, die von der Natur aufgebrauchte Leistung. Je größer diese Leistung ist, desto mehr Zeit ist zur Erneuerung der Ressource erforderlich. Im Allgemeinen erhöht sich die von der Natur aufgebrauchte Leistung mit der Anzahl der erforderlichen Prozesse und folglich auch mit der Zeit. [4] Dies bedeutet im weiteren Sinne, dass die Aufrechterhaltung unserer Technologie, unseres Lebensstandards umso schwieriger ist, je länger die Zeitspanne zur Erneuerung der Ressource ist.

Wegen der Unwägbarkeiten, die makroskopischen Bewertungsmethoden [5] innehaben, kann der Energie-Ansatz für eine umfassende Analyse eines Systems allein nicht ausreichen. Diese Methode steuert anhand ihrer Analysewerkzeuge [6] jedoch Informationen bei, die zur Bewertung der Effizienz und der Umweltauswirkungen eines Systems unabkömmlich sind. Des weiteren gilt es, den Bereich dieser Disziplin noch weiter zu erkunden und konkret zu nutzen, bei dem es darum geht, nicht mehr die Energie der benutzten Ressourcen zu untersuchen, sondern darum, die der ausgestoßenen Schadstoffe zu ermitteln und deren Leistungsindikatoren zu bestimmen (LDI/PDI; [7]; Energie der Ökosysteme; [8]).

4.2 Methode

Der Begriff Emergy (Energie) ist eine Kurzform des englischen „embodied energy“. Die Emergie einer Ressource besteht aus der Energie, die durch die vorgelagerte Prozesskette zu ihrer Bereitstellung aufgebracht wurde.

Die Emergie wird ausgedrückt in „sej“ (Solar Embodied Joule). Es gibt jedoch drei Energiequellen, die Grundlage aller auf der Erde beobachteten physikalischen Prozesse sind: die Sonne, die Erdwärme und die Gezeitenenergie. Um mit nur einer Einheit zu rechnen, werden die Wärme der Erdkruste und die Gezeitenenergie in „sej“ umgerechnet. [4]

Die zum globalen Ablauf aller irdischen Prozesse erforderliche Energie wird auf Basis dieser Quellen bestimmt [4]. Danach wird dieser Wert auf eine Bezugseinheit (J, kg, m³...) bezogen. Der Transformationsfaktor ("Transformity"), der Begriff für das entsprechende Verhältnis, wird dabei in sej/Einheit ausgedrückt. Die einzelnen Transformationsfaktoren werden zur Berechnung der Emergie eines Systems herangezogen. So wird beispielsweise jedes Kilogramm Eisenerz, das für einen Prozess notwendig ist mit dem Transformationsfaktor des Eisens (sej/kg) multipliziert, um den gesamten Energieaufwand von seiner Abgabe durch den Erdmantel bis hin zu den Faktoren und Prozessen (Erosion, Wasserkreislauf, Hebung, Wind, usw.) zu berechnen, die das Erz auf eine zur Abbaubarkeit ausreichende Konzentration bringen.

Die emergetische Analyse besteht folglich darin, eine Tabelle anzulegen, in der sämtliche Inputs zusammengestellt sind und diese mit ihrem Transformationsfaktor zu multiplizieren. Die Tabelle kann in unterschiedlicher Art und Weise aufgebaut werden, um verschiedene Verhältniszahlen zu berechnen, die die Interpretation der Ergebnisse vereinfachen. Der Aufbau der Tabelle hängt auch von der Menge und der Art der Informationen ab.

4.3 Wertschöpfung für das Unternehmen

Die Wertschöpfung für das Unternehmen stellt sich nicht unmittelbar ein wie es bei einer Optimierung des Energieverbrauchs und einer durch energetische oder exergetische Analysen erzielten Kostenreduzierung der Fall sein kann.

Der Mehrwert ist auf Ebene der Umweltpolitik des Unternehmens angesiedelt. Das Unternehmen kann hierdurch seine Bemühungen zu Gunsten einer wirklich umweltverträglichen Nachhaltigkeit hervorheben. Dabei handelt es sich wohlgerne nicht um eine Nachhaltigkeit aus dem Blickwinkel menschlicher Interessen, sondern um eine physikalische Nachhaltigkeit aus dem Blickwinkel der Natur.

Wie obenstehend bereits angedeutet, ist darauf hinzuweisen, dass diese Methode zusätzlich, d.h. ergänzend durchzuführen ist bzw. selbst durch eine andere Methode ergänzt werden muss, die eine Wertschöpfung in einem anderen Bereich (Nachhaltigkeit aus menschlicher Sicht) induziert.

4.4 Beispiel: emergetische Analyse der Biogas-Produktion

Die Produktion von Biogas durch trockene Monofermentation von energetischen Kulturpflanzen und die Einspeisung von Biogas ins Erdgasnetz wurden im Rahmen des Projekts LuxCycle [9] untersucht. Dieses Projekt bezieht nationale und europäische

Forderungen ein, alternative Kraftstoffe zu fördern, um die Ziele des Kyoto-Protokolls und eine größere Energieunabhängigkeit zu erreichen. Dieses Vorhaben wurde durch den luxemburgischen Staat (MCESR) finanziert. Dabei waren das CRP Gabriel Lippmann und die Universität Luxemburg mit den technischen Fragestellungen beauftragt, während das CRP-Henri Tudor (CRTE) den umweltwissenschaftlichen Teil und die Ausführung der Lebenszyklusanalyse übernahm.

Auf Grundlage des von LuxCycle erhobenen Datenbestandes konnten die Schaubilder 6a und 6b sowie die Tabelle 2 im Rahmen des AGID Projekts erstellt werden.

Tabelle 2: Tabelle der emergetischen Analyse der Biogasproduktion

Emergetische Bewertung von Biogas aus der Monofermentation von energetischen Kulturpflanzen					
Nummer	Bezeichnung	Einheit	Wert (Einheiten/ha/Jahr)	Transformity (sej/Einheit)	Solar-Energie (E13/sej/ha/Jahr)
Erneuerbare Ressourcen (ER)					
1	Sonne	J	3.1E+13	1.0E+00	3.1E+00
2	von den Pflanzen verbrauchtes Wasser	J	2.8E+10	2.6E+04	7.3E+01
3	von einer Turbine verbrauchtes Wasser	J	9.0E+10	4.7E+04	4.2E+02
Größte genutzte ER					4.2E+02
Nicht Erneuerbare Ressourcen (NER)					
4	Nettoverlust an Bodenfläche	J	1.1E+09	1.2E+05	1.4E+01
5	Braunkohle	J	4.9E+09	6.7E+04	3.3E+01
6	Steinkohle	J	7.8E+09	6.7E+04	5.2E+01
7	Grubengas	J	1.8E+08	8.1E+04	1.4E+00
8	Erdgas	J	4.8E+10	8.1E+04	3.9E+02
9	Rohöl	J	4.3E+10	9.1E+04	3.9E+02
10	Torf	J	2.3E+05	3.2E+04	7.4E-04
11	Uran	J	1.0E+10	3.0E+03	3.1E+00
12	Erz	g	2.5E+06	1.7E+09	4.2E+02
NER insgesamt					1.3E+03
ER und NER insgesamt (Y)					1.7E+03
Biogas-Transformity					
13	Auf Basis des Brennwertes	J		7.7E+04	sej/J
14	Auf Basis des Heizwertes	J		8.5E+04	sej/J
Verhältnis					
15	Emergetischer Wirkungsgrad (EW)			Y/NER	1.32
16	Umweltbelastungszahl (U)			NER/ER	3.10
17	Emergetischer Nachhaltigkeitsindex (EN)			EW/U	0.43

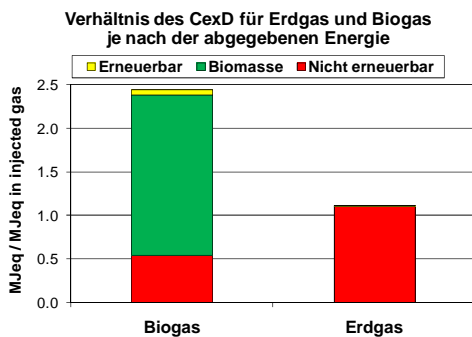


Abbildung 6a) Exergetische Analyse

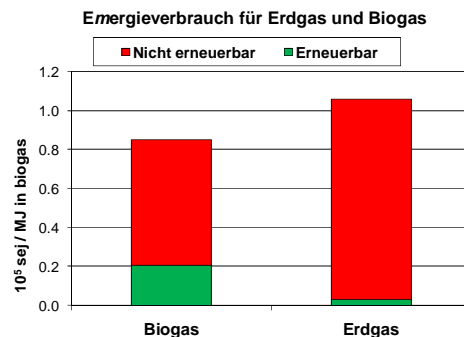


Abbildung 6b) Emergetische Analyse

Die Analyse der Ergebnisse lässt folgende Schlussfolgerungen zu:

- Anhand der emergetischen Analyse ist die Entscheidung zu Gunsten des Biogases zu fällen, da es einen Gesamtenergieverbrauch ausweist, der unter dem des Er-

dgases liegt (Abbildung 6b). Dies wäre allein auf Grundlage einer exergetischen Analyse (Abbildung 6a) nicht möglich gewesen.

- Es wird aufgezeigt, dass der Prozess der Biogasproduktion noch optimiert werden muss, um den Wirkungsgrad des Systems, d.h. die direkt nutzbare Energiemenge zu optimieren (Abbildung 6a). Dies wäre allein durch die emergetische Analyse nicht möglich gewesen.
- Es wird deutlich, dass die Annahme, Biogas sei eine Energiequelle mit einem hohen Erneuerungspotential, nicht immer zutrifft. Die exergetische Analyse für sich allein hätte Biogas aufgrund des hohen Anteils (75 %) erneuerbarer Energie als relativ nachhaltig eingestuft, während die emergetische Analyse einen Anteil von nur 25 % erneuerbarer Energie aufzeigt.

Letztere Schlussfolgerung zeigt wie wichtig es ist, das System in seiner Gesamtheit zu betrachten. Die Erneuerbarkeit eines Systems hängt nicht nur von den menschlichen Beiträgen und Auffassungen ab, sondern auch vom Beitrag der Natur, den es zu berücksichtigen gilt. Angesichts der Erschöpfung der Energiequellen ist die Produktion von hochwertigen Kraftstoffen wie Biogas keinesfalls eine ausreichende Alternative. Die Senkung des Energieverbrauchs muss im Vordergrund stehen bzw. mindestens den gleichen Stellenwert haben wie die Produktion von Qualitätskraftstoffen, da es kein Verfahren gibt, das ohne einen erheblichen direkten oder indirekten Beitrag der Natur auskommt.

5 Lebenszyklusanalyse (LCA)

Autoren: ENRICO BENETTO, COLIN JURY

5.1 Zielsetzungen

Die energetische Analyse hat zum Ziel, eine einzige Kennzahl für die Umwelt Nachhaltigkeit eines Systems bzw. zumindest einen aggregierten Indikator für seine Umweltleistungen bereitzustellen. Hierzu wird der Lebenszyklus des Systems betrachtet. Die Umweltauswirkungen sind jedoch sehr vielfältiger Art und können mehrere Schwerpunkte zu beschützender Güter umfassen, nämlich den Klimawandel, die menschliche Gesundheit, die Qualität der Ökosysteme, die Ressourcen, die anthropogene Umwelt (z.B. Gebäude) usw. Es ist schwierig, diese Umweltauswirkungen in einem einzigen Indikator zusammenzuführen, ohne ein Gewichtungssystem, anders gesagt die Präferenzen der Entscheidungsträger, einzusetzen. Die Lebenszyklusanalyse (LCA), auch Ökobilanz genannt, stellt ein ideales Werkzeug zur Bewertung der Umweltauswirkungen eines Produktes, eines Verfahrens oder einer Dienstleistung über den gesamten Lebensweg dar. Das Ziel der LCA besteht nicht nur darin, die Umweltleistung zu bestimmen, um Entscheidungsträgern und Verbrauchern bei der Auswahl zwischen verschiedenen Prozessen oder Produkten mit gleichen Funktionen eine Hilfestellung zu geben, sondern auch darin, die Schraubstellen zur Kontrolle der Umweltverschmutzung oder des Energieverbrauchs herauszuarbeiten, um so eine Orientierungshilfe bei der Erforschung von Lösungen und gegebenenfalls von neuen Technologien zu bieten.

5.2 Methode

Die Lebenszyklusanalyse wird durch die Normenreihe ISO 14040 formalisiert und gliedert sich in folgende Schritte:

Festlegung der Ziele und des Untersuchungsrahmens

Dieser Schritt besteht in der Festlegung der von den Ergebnissen der Untersuchung betroffenen Personen, der Funktion des Produktes bzw. des Prozesses sowie der Ziele der Untersuchung (z. B. Vergleich verschiedener Systeme, Bestimmung der schadstoffreichsten Prozesse). Dies erlaubt es, die Grenzen und den Rahmen der Untersuchung für die folgenden Schritte festzulegen. Bei der Datenerhebung ist es möglich, die Ziele und die Tragweite der Untersuchung entsprechend der vorliegenden Datenlage anzupassen.

Sachbilanz

Die Sachbilanz besteht im Erfassen der Inputs (Rohstoffe, Energie, Fläche...), der wesentlichen Outputprodukte, der Co-Produkte und der Schadstoffemissionen (in gasförmiger, flüssiger oder fester Form) sämtlicher Prozesse des Lebenszyklus. Gleichartige Input- und Outputströme der verschiedenen Prozesse werden anschließend aggregiert.

Wirkungsabschätzung

Für die Wirkungsabschätzung gibt es zwei Ansätze: Der problemorientierte Charakterisierungsansatz mit Fokus auf die so genannten "Midpoints" und den schadensorientierten Ansatz, der sich auf die "Endpoints" bezieht.

Der problemorientierte Ansatz nimmt eine Klassifizierung der erfassten Daten in Wirkungskategorien (Treibhauseffekt, Versauerung, usw.) vor. Die Wirkungsergebnisse jeder Kategorie werden anschließend mittels Charakterisierungsfaktoren berechnet, welche den Beitrag eines jeden Stoffes zur entsprechenden Wirkungskategorie ermitteln. In der Praxis entspricht dies einer Gegenüberstellung zwischen dem Potential eines Moleküls hinsichtlich einer bestimmten Wirkung und dem Potential eines Referenzmoleküls. So ist beispielsweise ein Kilogramm Methan in Bezug auf die Verstärkung des Treibhauseffekts gleichwertig mit 23 kg CO₂. Bei dieser Vorgehensweise werden sämtliche Treibhausgase des Systems in Kilogramm CO₂-Äquivalent (kg CO₂-Äq.) ausgedrückt. Beispiele für Midpoint-Methoden sind CML 2002 [10] und EDIP 2003 [11].

Der schadensorientierte Ansatz geht in der Ursache-Wirkungskette weiter. Er betrachtet die Auswirkungen auf den Menschen und das Ökosystem sowie die Erschöpfung der Ressourcen. So wird etwa der Treibhauseffekt akuter Trockenperioden nach sich ziehen und sich durch eine Verringerung des verfügbaren Wassers auf das Ökosystem auswirken. Aufgrund erschwelter Anbaubedingungen in bestimmten Regionen der Welt kann die Trockenheit aber auch Mangelernährung zur Folge haben, die der menschlichen Gesundheit schadet. Die Methode Eco-Indicator 99 [12] ist ein Beispiel für einen Endpoint-Ansatz.

Je mehr man versucht, die Auswirkungen auf die Endpunkte zu ermitteln, desto größer werden die Unsicherheiten in der Aussage. Aus diesem Grund wird der Midpoint-Ansatz generell häufiger verwendet als der Endpoint-Ansatz. Dabei wächst jedoch zunehmend das Interesse an Midpoint-Endpoint-Verfahren, die beide Methoden miteinander kombinieren und immer öfter empfohlen werden. Die Methode "Impact2002+" [3] und das Verbundprojekt ReCiPe (laufende Entwicklung) sind zwei Beispiele hierfür.

Auswertung der Ergebnisse:

Dieser letzte Schritt umfasst die Auswertung und Überprüfung der Ergebnisse. Die durchgeführte Untersuchung erlaubt es nunmehr, die Prozessschritte im Wissen um die Grenzen und Unsicherheiten herauszuarbeiten, die bei den verschiedenen untersuchten Auswirkungsklassen eine vorrangige Rolle spielen. Die Analyse des Beitrags der Moleküle zu den verschiedenen Auswirkungsklassen erlaubt es, die verbesserungswürdigen Teile des Systems zu bestimmen. Durch die Sensitivitätsanalyse können die Schlüsselkomponenten des Systems identifiziert werden, bei denen selbst eine geringfügige Schwankung eine signifikante Veränderung der Ergebnisse nach sich zieht. Die Konsistenzanalyse erlaubt es, die Schwankungen der Ergebnisse in Abhängigkeit von den Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Schlüsseldaten des Systems zu beobachten. Dabei geht es auch um die Aufdeckung von Schwachstellen der Untersuchung bezüglich Qualität oder Variabilität der Daten.

5.3 Wertschöpfung für das Unternehmen

Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse stellen detaillierte und ausführliche Informationen über die Umweltleistung der untersuchten Produkte bereit, die nach einer standardisierten und wissenschaftlich fundierten Verfahrensweise erhoben wurden. Sie stellen folglich eine Grundlage für das Produktbenchmarking, die interne und externe Umweltkommunikation sowie die Verbesserung der Prozesse dar.

Die Ökobilanz erlaubt es, einen Wettbewerbsvorteil eines Produktes im Vergleich zu einem Konkurrenzprodukt nachzuweisen und die möglichen Verbesserungen über seinen gesamten Lebensweg zu identifizieren.

Aus diesen Gründen ist die Lebenszyklusanalyse ein Hilfswerkzeug bei Entscheidungsprozessen, das bei Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen zunehmend zum Einsatz kommt. Mehrere gemeinschaftliche Richtlinien und methodischen Ansätzen wurden ausgehend von Ökobilanzergebnissen oder mittels eines Ökobilanzverfahrens festgelegt, z. B.: das europäische Umweltzeichen, die europäische Ecodesign-Richtlinie 2005/32/EC für energiebetriebene Produkte, das Programm "Environmental Technologies Action Plan" (ETAP), die Integrierte Produktpolitik (IPP), usw. Die Lebenszyklusanalyse wird weiterhin als Instrument zur Überprüfung der Umweltleistungen neuer Technologien, bei in Entwicklung befindlichen Überprüfungsplänen (z.B. Projekt TESTNET) und in den Texten des 7. Rahmenprogramms für Forschung und Entwicklung (FP7) empfohlen.

5.4 Beispiel: Die Lebenszyklusanalyse des Einsatzes von Biogas für Kraft-Wärme-Kopplung und Transport

Die Lebenszyklusanalyse wird zur Bestimmung der Wettbewerbsfähigkeit des Biogases eingesetzt, das im Projekt "Luxcycle" (§4.4) für zwei Nutzungsarten untersucht wurde: Zum einen für die Verbrennung in einem BHKW von 1MW elektrischer Leistung und zum anderen zur Nutzung als PKW-Treibstoff.

Bei beiden Nutzungsvarianten werden die durch Holzvergasung und durch Fermentation von Mist und anderen Substraten (Co-Fermentation im Nassverfahren) erzeugten Gase als Vergleichsbasis eingesetzt. Bei der Erzeugung von Elektrizität und Wärme im Kraft-Wärme-Kopplungs-Szenario 1MWe, werden weiterhin auch Rapsöl und Erdgas untersucht. Beim zweiten Nutzungsszenario (PKW-Treibstoff) ist Benzin der Referenzkraftstoff. Des Weiteren wird aus Zuckerrüben gewonnenes Äthanol untersucht.

Ergebnisse für das BHKW 1MWe

Die Ergebnisse des Szenarios BHKW 1 MWe werden in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3: Die Zahlen stellen den prozentualen Unterschied zwischen dem Umweltschaden alternativer Kraftstoffe im Vergleich zum Umweltschaden durch Erdgas bei einer Nutzung in einer 1MWe BHKW-Anlage dar. Die Farben zeigen die absoluten Unterschiede zwischen den alternativen Kraftstoffen und dem Erdgas. Die Einheit beträgt " 10⁶ Punkte". Rot stellt eine Verstärkung des Umweltschadens > 10 Einheiten dar; Orange 10 > x > 5; Gelb 5 > x > 0; Hellgrün stellt eine Verringerung um 0 > x > 5 Einheiten dar; Dunkelgrün > 5. Die eingesetzte Methode zur Wirkungsabschätzung ist Impact2002+ v2.1.

	Klimawandel	Qualität des Ökosystems	Menschliche Gesundheit	Ressourcenerschöpfung
Co-Fermentation	-52	201	80	-80
Monofermentation	-35	3173	89	-59
Vergasung	-73	907	26	-71
Rapsöl	131	6487	572	103

Was die Erschöpfung der Ressourcen und die Auswirkung auf den Klimawandel betrifft, sind alle drei Gasarten leistungsstärker als Erdgas. Dagegen sind die schädlichen Einwirkungen auf das Ökosystem und die menschliche Gesundheit bei den alternativen Kraftstoffen stets größer als beim fossilen Referenzkraftstoff.

Da alle Umweltschäden in Punkten⁵ ausgedrückt werden, ist eine Aggregation möglich, um eine Gesamtwertung zu erhalten und so die Gegenüberstellung zu vereinfachen. Hierzu müssen die Schadenskategorien je nach ihrer relativen Bedeutung für die Entscheidungsträger gewichtet werden. Mit Hilfe des Tools "Mixtri2"⁶ konnten sämtliche möglichen Gewichtungen berücksichtigt werden. Es sei darauf hingewiesen, dass die Gewichtungen der drei Schadensklassen gemäß [12], global stets um 20 % höher liegen. Dies wird durch das kleine mittlere Dreieck ausgedrückt, das den Bereich der wahrscheinlichsten Gewichtungssets in den Abbildungen 7, 8, 9 und 10 darstellt.

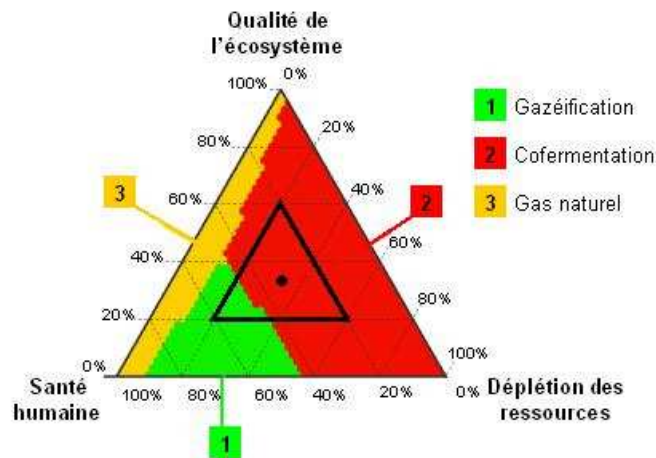


Abbildung 7:⁷ Einstufung der Kraftstoffe nach ihrem aggregierten Umweltschaden. Je größer die Fläche ist, umso höher ist auch die Anzahl der Gewichtungen gemäß derer der Kraftstoff den anderen vorzuziehen ist. I2002+ v2.1

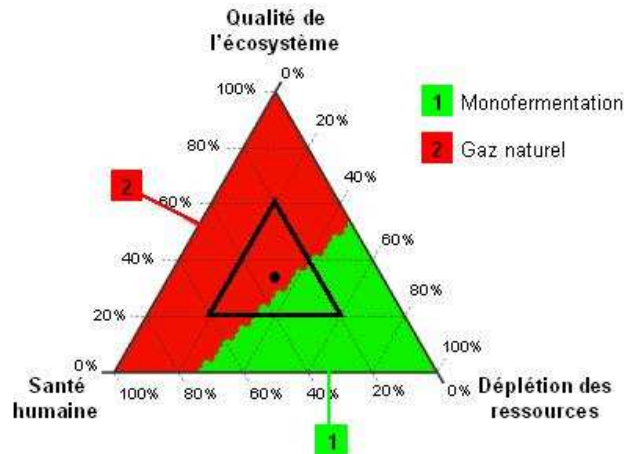


Abbildung 8:⁸ Einstufung der Kraftstoffe nach ihrem aggregierten Umweltschaden. Je größer die Fläche ist, umso höher ist auch die Anzahl der Gewichtungen gemäß derer der Kraftstoff den anderen vorzuziehen ist. I2002+ v2.1

⁵ Ein Punkt stellt den Schaden dar, der von einem Durchschnittseuropäer im Jahre 2000 verursacht wurde.

⁶ <http://www.doka.ch/EI99/mixtri.htm>

⁷ Qualité de l'écosystème: Qualität des Ökosystems; Santé humaine: menschliche Gesundheit; Déplétion des ressources: Ressourcenschöpfung; Gazéification: Vergasung; Cofermentation: Co-Fermentation; Gaz naturel: Erdgas; Monofermentation: Monofermentation

Abbildung 7 zeigt, dass die Co-Fermentation (rote Färbung) die beste Alternative darstellt um (Bio)gas herzustellen, ihr Flächenanteil ist am größten, insbesondere in dem kleinen Dreieck. An zweiter und dritter Stelle folgen die Holzvergasung und der fossile Kraftstoff. Bei sämtlichen Gewichtungssets sind Äthanol und die Monofermentation stets leistungsschwächer als die anderen Kraftstoffe und erscheinen folglich nicht.

Allein im Vergleich mit dem Erdgas ist die Monofermentation wettbewerbsfähig, wenn die Gewichtung der Ressourcenerschöpfung über 40 % liegt (Abbildung 8). Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass der Klimawandel beim Einsatz der Methode I2002+ [3] nicht in die Gesamtwertung einfließt. Somit dürfte die Fläche, in der Biogas vorherrschend ist, größer sein, was jedoch schwierig abzuschätzen ist.

Wenn die Berechnung nach der Methode der Schadensbewertung Ecolndicator99 [12] erfolgt, so fallen die Ergebnisse relativ ähnlich aus, obwohl sie den Klimawandel in die Schadenskategorie „menschliche Gesundheit“ mit einbezieht.

Hieraus lässt sich folgern, dass die Monofermentation nur dann wettbewerbsfähig sein kann, wenn die Ressourcenerschöpfung und der Klimawandel für die Entscheidungsträger zu prioritären Problematiken werden oder, wenn der Prozess erheblich verbessert wird.

Ergebnisse für den Transport

Die Ergebnisse des Transportszenarios sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Die Zahlen stellen den prozentualen Unterschied zwischen dem Umweltschaden alternativer Kraftstoffe im Vergleich zum Umweltschaden durch Erdgas bei einer Transportnutzung dar. Die Farben zeigen die absoluten Unterschiede zwischen den alternativen Kraftstoffen und dem Erdgas. Die Einheit beträgt "10⁻⁶ Punkte". Rot stellt eine Verstärkung des Umweltschadens > 10 Einheiten dar; Orange 10 > x > 5; Gelb 5 > x > 0; Hellgrün stellt eine Verringerung um 0 > x > 5 Einheiten dar; Dunkelgrün > 5. Die eingesetzte Methode zur Wirkungsabschätzung ist Impact 2002+ v2.1.

	Klimawandel	Qualität des Ökosystems	Menschliche Gesundheit	Ressourcenerschöpfung
Co-Fermentation	-37	246	18	-67
Monofermentation	-15	760	24	-36
Vergasung	-66	367	-14	-54
Äthanol	1	165	-20	2

Was die Erschöpfung der Ressourcen und die Auswirkung auf den Klimawandel betrifft, sind alle drei Gasarten leistungsstärker als Erdgas. Dagegen sind die schädlichen Einwirkungen auf das Ökosystem und die menschliche Gesundheit bei den alternativen Kraftstoffen stets größer als beim fossilen Referenzkraftstoff. Eine Ausnahme hierzu bilden die Holzvergasung und das Äthanol in der Kategorie "menschliche Gesundheit".

Abbildung 9 stellt die gewichteten Ergebnisse der Transportszenarien dar und zeigt, dass aus der Co-Fermentation gewonnenes Biogas in den Gewichtungssets dominiert. Dennoch können aus der Holzvergasung gewonnenes Gas sowie Erdgas unter gewissen Bedingungen wettbewerbsfähig sein. Die Monofermentation erscheint in der

⁸ Qualité de l'écosystème: Qualität des Ökosystems; Santé humaine: menschliche Gesundheit; Déplétion des ressources: Ressourcenerschöpfung; Gazéification: Vergasung; Cofermentation: Co-Fermentation; Gaz naturel: Erdgas; Monofermentation: Monofermentation

Darstellung nicht, da ihr Umweltschaden im Vergleich zu den anderen Kraftstoffe größer ist. Abbildung 10 vergleicht lediglich Äthanol, Biogas aus der Monofermentation und den fossilen Kraftstoff. Für dieses Szenario zeigt sich, dass Kraftstoff aus Erdgas einen grösseren Einfluss auf die Qualität des Oekosystems hat als Biogas aus der Monofermentation oder als Äthanol.

Wenn die Berechnung nach der Methode der Schadensbewertung EcoIndicator99 [12] erfolgt, so schneiden die alternativen Kraftstoffe im Vergleich zum fossilen Kraftstoff deutlich besser ab, insbesondere die Co-Fermentation und die Holzvergasung, die nun eindeutig am leistungsstärksten sind. Auch Äthanol und die Monofermentation verbessern sich, wenn auch in geringerem Maße, und Benzin bleibt ihnen überlegen.

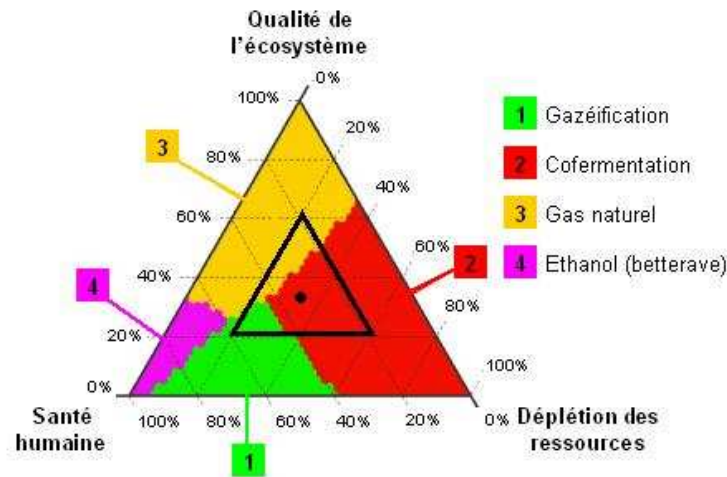


Abbildung 9:⁹ Einstufung der Kraftstoffe nach ihrem aggregierten Umweltschaden. Je größer die Fläche ist, umso höher ist auch die Anzahl der Gewichtungen gemäß derer der Kraftstoff den anderen vorzuziehen ist. I2002+ v2.1

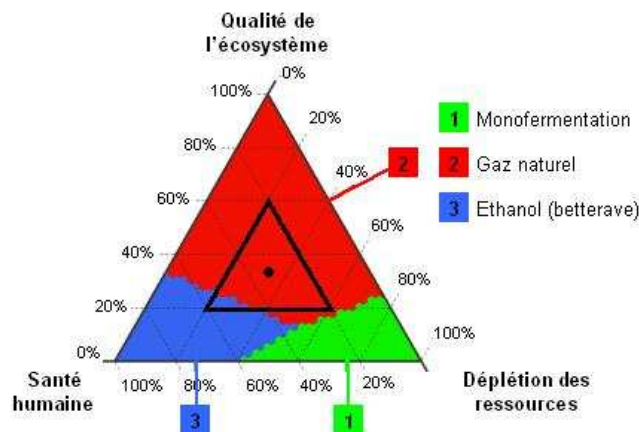


Abbildung 10:¹⁰ Einstufung der Kraftstoffe nach ihrem aggregierten Umweltschaden. Je größer die Fläche ist, umso höher ist auch die Anzahl der Gewichtungen gemäß derer der Kraftstoff den anderen vorzuziehen ist. I2002+ v2.1.

⁹ Qualité de l'écosystème: Qualität des Ökosystems; Santé humaine: menschliche Gesundheit; Déplétion des ressources: Ressourcenerschöpfung; Gazéification: Vergasung; Cofermentation: Co-Fermentation; Gaz naturel: Erdgas; Monofermentation: Monofermentation

Hieraus lässt sich folgern, dass die Gewinnung von Biogas aus der Monofermentation nur dann wettbewerbsfähig sein kann, wenn die Ressourcenerschöpfung und der Klimawandel für die Entscheidungsträger zu prioritären Problematiken werden oder wenn der Prozess erheblich verbessert wird.

¹⁰ Qualité de l'écosystème: Qualität des Ökosystems; Santé humaine: menschliche Gesundheit; Déplétion des ressources: Ressourcenerschöpfung; Gazéification: Vergasung; Cofermentation: Co-Fermentation; Gaz naturel: Erdgas; Monofermentation: Monofermentation

6 Ecodesign

Autoren: ENRICO BENETTO, JULIEN CARTON, PAULA HILD, COLIN JURY

6.1 Zielsetzungen

Alle bislang vorgestellten Methoden werden zur Verbesserung bereits bestehender Produkte oder Prozesse angewendet. Doch auch hier gilt die Faustregel "Vorbeugen ist besser als Heilen" oder anders gesagt: Es ist vorteilhafter, ein Produkt bzw. Verfahren bereits in der Entwurfsphase unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten zu optimieren. Welche methodische Vorgehensweise kann in dieser kritischen Lebenswegphase eines Produkts oder Prozesses angewendet werden?

Ecodesign steht für eine umweltgerechte Produktgestaltung und berücksichtigt Umweltkriterien beim Entwurf neuer Produkte, Verfahren und Dienstleistungen und wird im Rahmen der Norm ISO/TR 14062 formalisiert. Ecodesign zielt darauf ab, bei gleichzeitiger Erhaltung (bzw. Verbesserung) der Funktionalität des Produktes, seine Umweltbelastungen über den gesamten Lebensweg zu mindern.

6.2 Methode

Die methodische Vorgehensweise im Rahmen eines Ecodesign Prozesses wird von der Norm ISO 14062 nicht festgelegt. Fasst man jedoch die in der Fachliteratur [13-25] ausgeführten Ansätze zusammen, so lassen sich sechs Hauptschritte zur strukturierten Vorgehensweise ausmachen.

Projektplanung

Dieser Schritt umfasst:

- Die Festlegung der Hauptfunktionen und Zielsetzungen des Produktes im Anschluss an eine Analyse der Kunden- und Marktnachfrage,
- Die Bildung des Projektteams; die Auswahl von Mitgliedern, die komplementäre Kompetenzen und Eigenschaften besitzen ist sehr wichtig, um die Gefahr einer schlechten oder unzulänglichen Kommunikation mit den Entwicklern zu vermeiden.

Festlegung der Produktspezifikationen

- Definition der Produktmerkmale (funktionelle, ästhetische, technische, usw.),
- Marktstudie,
- Technisch-wirtschaftliche Studie (Benchmarking, technisches Follow-Up, Kostenanalyse),
- Untersuchung der Regelwerke,
- Abschätzung der Umweltauswirkungen des Produktes über seinen gesamten Lebensweg: quantitative (mittels Lebenszyklusanalyse) oder qualitative Bewertung.

Produktentwicklung

Es geht darum, verschiedene Alternativen für das Produktkonzept unter Beeinflussung folgender Aspekte vorzuschlagen:

- die Materialintensität und Energieintensität des Produkts (Materialstärke der Komponenten, Energieverbrauch in der Nutzungsphase),
- die Zusammensetzung (Wahl der Werkstoffe, der Zusatzstoffe),
- die Montage der Komponenten mit der Anforderung, das Verpackungsvolumen zu minimieren, die Demontage am Lebensende zu vereinfachen, usw.,
- die Szenarien für das Lebensende und den Transport.

Mit Hilfe von kreativen Entwicklungstools und Brainstorming können neue Alternativen gestaltet werden. Diese Produktalternativen werden danach mit Hilfe von Checklisten und/oder Leitfäden bewertet.

Vorläufiges Produktkonzept

In dieser Phase geht es darum zu prüfen, welche der in der vorangehenden Phase entwickelten Produktkonzepte den in der Projektplanungsphase ausgearbeiteten Zielsetzungen der umweltverträglichen Gestaltung entsprechen. So werden die vielversprechendsten Alternativen ausgewählt. Eine vereinfachte Lebenszyklusanalyse kann sich als erforderlich erweisen, um diese Übereinstimmung zu überprüfen und schlussendlich eine oder zwei Alternativen zur weiteren Entwicklung festzuhalten.

Detailliertes Produktkonzept

Die ausgewählten Produktalternativen werden nun vollständig entwickelt, um einen oder mehrere Prototypen des Produkts anzufertigen. In diesem Stadium ist eine Lebenszyklusanalyse notwendig, um die umweltrelevanten Vorzüge dieser Alternativprodukte im Vergleich zum Ausgangsprodukt abzuschätzen.

Entwicklung, Industrialisierung und Marketing

Es handelt sich um die letzten Etappen, die den Erfolg des Ecodesign-Produktes ganz wesentlich beeinflussen. Sie werden in vorliegendem Bericht nicht behandelt.

6.3 Wertschöpfung für das Unternehmen

Für das Unternehmen ergibt sich aus der Ecodesign-Herangehensweise eine Wertschöpfung in mehrfacher Hinsicht.

Antizipieren der normativen Anforderungen: Über ein breitangelegtes Spektrum politischer Instrumente und Richtlinien (z.B. Integrierte Produktpolitik, Energiebetriebene-Produkte-Richtlinie) fördert die Europäische Kommission mit Nachdruck einen Markt, der umweltverträglich gestaltete Produkte begünstigt. Weitere Richtlinien wie REACH betreffen eine Vielzahl industrieller Branchen und werden wahrscheinlich tiefgreifende Veränderungen im produzierenden Gewerbe nach sich ziehen, so etwa die Verbannung bestimmter Substanzen und Werkstoffe. All diese Initiativen können spürbare Auswirkungen auf Industriezweige haben, die nicht auf die Umsetzung der Richtlinie vorbereitet sind. Das Vorgehen im Rahmen eines Ecodesign Prozesses erlaubt es, diese politischen Anforderungen aufzugreifen und in einigen Fällen sogar, dessen Zielsetzungen zu antizipieren und zu übertreffen.

Umweltinformation: Im Rahmen eines Ecodesign Prozesses werden detaillierte Umweltinformationen zu den Produkten und ein Benchmarking anhand einer (wissenschaftlich fundierten) Standardabschätzung der Umweltleistungen ausgearbeitet und bereitgestellt. Diese Informationen bringen den Nachweis der verringerten Umweltbe-

lastung eines Produktes. Eine abschließende Ökobilanz kann außerdem sicherstellen, dass es nicht zu einer Verlagerung von Umweltauswirkungen kommt. Darüber hinaus lassen sich die Kundenerwartungen gezielter identifizieren und berücksichtigen, Optimierungen konzentrieren sich i.d.R. zunächst auf die Produktfunktionen und erst in einem zweiten Schritt auf das Gesamtprodukt.

Innovation: Das Nachdenken über Umweltauswirkungen eines Produktes bereits in der Entwurfsphase eröffnet neue Blickwinkel und ermöglicht so die Identifizierung neuer Ideen und Marketingverfahren, neuer umweltverträglicher Lösungen und Konzepte, eine bessere Sensibilisierung und Information der Verbraucher und eine optimierte interne und externe Kommunikation.

Umweltimage: Ecodesign ermöglicht eine deutliche Differenzierung auf dem Produktmarkt. Bereit gestellte Umweltinformationen bieten dabei eine Grundlage für kundenorientierte Kommunikation und Marketing beispielsweise mittels Umweltzeichen oder Umweltprodukterklärungen. Das Streben nach ständiger Produktverbesserung, das der umweltverträglichen Produktgestaltung innewohnt, sorgt dabei für das Nachhaltigkeitsimage des Unternehmens.

6.4 Beispiel: Ecodesign eines mehrlagigen Biopolymer-Werkstoffs

Polylactid (PLA) ist ein Bio-Polymer, das durch Hydrolyse und Fermentation aus Mais gewonnen wird. PLA hat auf Grund seiner mechanischen Eigenschaften und biologischen Abbaubarkeit mehrere Anwendungsbereiche (insbesondere in der Medizintechnik und in der Verpackungsindustrie) [26, 27]. Jedoch ist PLA teurer als herkömmliche Kunststoffe. Weiterhin haben PLA und PET sehr ähnliche Dichten, was die Trennung des PLA in Müllsortierungsanlagen mittels herkömmlicher Techniken unmöglich macht. Dies zieht die Verunreinigung der verschiedenen Kunststoffströme nach sich und wirkt sich nachteilig auf das Recycling von PET aus. Die Recyclingunternehmen werden sich deshalb so lange nicht für PLA interessieren bis das Recycling wirtschaftlich tragfähig wird. Im Rahmen des Forschungsvorhabens VALMAT¹¹, das durch den europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE), das luxemburgische Wirtschaftsministerium (MECO) und das luxemburgische Ministerium für Kultur, Hochschullehre und Forschung (MCESR) finanziert wird, arbeiten das Kompetenzzentrum technischer Umweltschutz (CRTE) und das Labor für industrielle Technologien (LTI) gemeinsam an der Entwicklung eines neuen mehrlagigen Verpackungstoffs für die Lebensmittelindustrie. Die Eigenschaften des neuen Werkstoffs wurden nach folgenden Grundsätzen festgelegt: 1) Er soll das chemische Recycling von PLA fördern und so die Umweltleistungen am Lebensende spürbar verbessern [28]; 2) er soll natürlich sein, eine deutliche Senkung der Produktionskosten der Verpackung auf PLA-Basis ermöglichen und seine biologische Abbaubarkeit erhalten (bzw. verbessern).

Es wurden verschiedene PLA-Mischungen und andere Polymere untersucht. Ausgewählt wurde schließlich eine Mischung aus PLA und TPS (thermoplastische Stärke aus Getreidestroh - [29]). Die mehrschichtige Struktur umfasst eine TPS-Schicht, die zwischen zwei äußeren PLA-Schichten liegt. Da die Dichte von TPS höher ist als die Dichte der anderen Thermoplasten, erfolgt die Trennung des mehrlagigen Werkstoffes von den anderen Kunststoffabfällen am Lebensende des Produktes durch Sedimentation.

¹¹ VALMAT: VALorisation des MATériaux (Aufwertung von Materialien)

Auch die biologische Abbaubarkeit des Mehrschichtstoffs konnte verbessert werden [30-32]. Da PLA jedoch hydrophob und TPS hydrophil ist, erweist sich ihre Kompatibilität als problematisch. Um die PLA-Oberfläche hydrophil und dadurch die Kompatibilität beider Stoffe herzustellen, wird getestet, die Oberfläche durch atmosphärische Plasmatechnik zu behandeln.

Das Endprodukt, welches im Rahmen eines Ecodesign-Prozesses ausgearbeitet werden soll, ist eine 500 ml Lebensmittelverpackung, die ausschließlich aus dem neuen Mehrschichtstoff besteht. Verschiedene, insbesondere durch unterschiedliche Schichtdicken und Betriebsparameter der Plasmabeschichtung entwickelte Produktalternativen, wurden durch eine ausführliche Lebenszyklusanalyse mit Hilfe der Software SimaPro®¹² untersucht und bewertet: Für diese Untersuchungen wurde die funktionale Einheit „Herstellung von 1.000 Lebensmittelverpackungen“ festgelegt.

Die besten für die Plasmabehandlung erzielten Betriebsparameter haben die Verringerung des Kontaktwinkels von 78° auf 30° ermöglicht, was einer Verbesserung der hydrophilen Eigenschaften entspricht. Diese Veränderung ist jedoch noch nicht stabil, da der Kontaktwinkel nach 10.000 Minuten erneut 60° erreicht.

Die Lebenszyklusanalyse der verschiedenen Produktalternativen erstreckt sich auf die Herstellung der Rohstoffe, den Produktionsprozess der Produkte (Extrusion der Folien, Thermoformung, Plasmabehandlung), den Transport, die Anfertigung der Verpackung und das Lebensende der Produkte. Die Nutzungsphase wurde im Rahmen der Untersuchung nicht betrachtet, da sie der einer Verpackung aus reinem PLA entspricht. Insgesamt wurden drei verschiedene Szenarien für das Lebensende untersucht: chemisches Recycling, anaerobe Zersetzung und Weiterverwertung von gemischten Kunststoffen, zum Beispiel für innerstädtische Lärmschutzpaneele, was derzeit die einzig vertretbare Recyclingmöglichkeit für PLA-haltige Kunststoffgemische darstellt. Die Verpackung aus einem Mehrschichtstoff hat derzeit höhere Umweltauswirkungen als das gleiche Produkt aus reinem PLA (Abbildung 9). Hierfür ist die atmosphärische Plasmabehandlung aufgrund des Energieverbrauchs bei der Produktion des Trägergases N₂ hauptverantwortlich. Die Untersuchung konnte die potenziellen Verbesserungen aufzeigen, nämlich eine Verkürzung der Behandlungsdauer und der Einsatz gefilterter Luft an Stelle von Flüssigstickstoff. Diese Verbesserungen einschließlich der Verringerung der Schichtdicken ermöglichen eine Herabsetzung der durch die Verpackungen verursachten Umweltschäden von 30 bis 43 % und machen somit den Mehrschicht-Verpackungsstoff gegenüber PLA wettbewerbsfähig.

¹² www.pre.nl

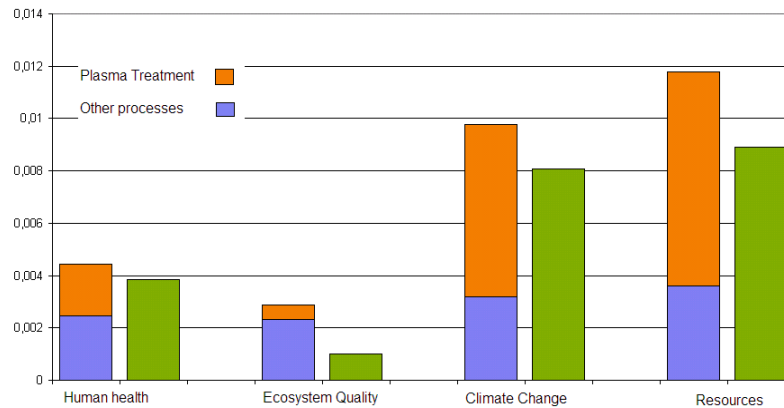


Abbildung 9: Umweltschäden (Impact2002+, ausgedrückt in Punkten) verursacht durch 1.000 Verpackungen aus reinem PLA (grün) und durch 1.000 Verpackungen aus einem Mehrschichtstoff

Anhand einer strukturierten Vorgehensweise, konnte die Wertschöpfung für das Unternehmen und die Umwelt durch Berücksichtigung von Umweltkriterien bei der Produktgestaltung (Ecodesign) aufgezeigt werden. Die Produktentwicklung (und gegebenenfalls die Herstellung von Prototypen) und die Überprüfung der Umweltleistungen durch eine Ökobilanz weisen allerdings ziemlich unterschiedliche Zeithorizonte auf. Die Entwicklung erfordert Entscheidungsfindungsprozesse und eine strategische Planung, zu denen die Lebenszyklusanalyse einen effizienten Beitrag leisten kann.

7 Schlussbemerkungen

Autor: ENRICO BENETTO

Die in dem vorliegenden Bericht vorgestellten Werkzeuge und methodischen Ansätze sowie die entsprechenden Anwendungsbeispiele ermöglichen drei zentrale Schlussfolgerungen.

Zunächst erweisen sich die Ansätze trotz sehr unterschiedlicher Methoden, Zielsetzungen und Hintergründe als komplementär. Gemeinsam ermöglichen sie die Verbesserung der Umweltleistungen der untersuchten Systeme wobei technische Machbarkeit und wirtschaftliche Analyse gekoppelt werden. Darüber hinaus werden auch wertvolle Informationen für Kommunikations- und Marketingzwecke bereitgestellt. Die Komplementarität der Werkzeuge untereinander sollte in späteren Untersuchungen genauer untersucht werden. So wäre es beispielsweise von Interesse, eine Kartografie der Werkzeuge mit Bezugnahme auf die relevanten Fragestellungen und Anwendungshintergründe auszuarbeiten.

Zweitens konnten die künftige Forschungsschwerpunkte ausgearbeitet werden. Ein Schwerpunkt im Rahmen von Energie- und Stoffstromanalysen wird zukünftig deren Anwendungen an komplexen Systemen sein, mit unterschiedlichen Energie- und Stoffströmen. Diese Systeme könnten zudem exergetisch optimiert werden. Im Rahmen von emergentischen Analysen wäre von Interesse, die Zweckdienlichkeit dieses Ansatzes zur Abschätzung bestimmter Umweltauswirkungen (beispielsweise der Verbrauch natürlicher Ressourcen wie Wasser oder fruchtbarer Boden) und die Analyse der Energieeffizienz weiter zu untersuchen. Und schließlich ist ein weiterer Schwerpunkt, die Lebenszyklusanalyse bzw. Ökobilanzierung noch besser in den Ecodesign-Prozess zu integrieren etwa durch die Entwicklung vereinfachter Auswertungswerkzeuge.

Schlussendlich zeigen die vorgestellten Beispiele, dass die methodischen Ansätze für den luxemburgischen Markt von großem Interesse und mit einem Mehrwert verbunden sind. Angesichts der diversifizierten industriellen Struktur in Luxemburg einerseits und den nationalen Zielsetzungen im Bereich erneuerbarer Energien andererseits liegt es auf der Hand, dass die Anwendung der Werkzeuge und methodischen Ansätze nicht nur einen konkreten Nutzen für die industriellen Akteure und institutionellen Stellen im Land bietet, sondern auch den idealen Rahmen für die Weiterentwicklung genannter Methoden bildet.

Literaturverzeichnis

1. Szargut, J., *EXERGY METHOD: Technical and Ecological Applications*. Developments in Heat Transfer Volume 18. 2005: WITpress. 164.
2. Dincer, I. and M.A. Rosen, *Exergy - energy, environment and sustainable development*. Elsevier. 2007. 454.
3. Jolliet, O., M. Margni, and R. Charles, *IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology*. International Journal of LCA, 2003. **8**(6): p. 324-330.
4. Odum, H.T., *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*. 1996: John Wiley & Sons, inc. 370.
5. Sciubba, E. and S. Ulgiati, *Emergy and exergy analyses: Complementary methods or irreducible ideological options?* Energy, 2005. **30**: p. 1953-1988.
6. Brown, M.T. and S. Ulgiati, *Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation*. Ecological engineering, 1997. **9**: p. 51-69.
7. Brown, M.T. and M.B. Vivas, *Landscape Development Intensity Index*. Environmental Monitoring and Assessment, 2004. **101**(1-3).
8. Brown, M.T. and E. Bardi, *Handbook of Emergy Evaluation: Folio #3: Emergy of Ecosystems*. Center for Environmental Policy Environmental Engineering Sciences. 2001, University of Florida: Gainesville. p. 94.
9. Jury, C., et al., *Life cycle assessment of biogas production by dry monofermentation of energy crops and injection into the natural gas grid*. To be submitted to Environment International, 2009.
10. Guinée, J.B., et al., *Life cycle assessment. An operational guide to the ISO standards*. 2002, Centre of Environmental Science: Leiden University, Leiden, The Netherlands.
11. Hauschild, M. and J. Potting, *Spatial differentiation in life cycle impact assessment - The EDIP 2003 methodology. Guidelines from the Danish Environmental Protection Agency*. 2003, Technical university of Denmark.
12. Goedkoop, M. and S. R., *Eco-indicator 99 methodology report, third edition*. 2001, PRé Consultant: Amersfoort.
13. ADEME, *Eco-design, What does it mean?* 2000, Ademe Publications.
14. Backer, C., *Environmental information for industrial designers*". 1995, Delft University of Technology: Netherlands.
15. Brezet, J.C. and C. Van Hemel, *Ecodesign: a promising approach to sustainable production and consumption*". 1997, PNUE: Paris, France.
16. Cramer, J. and C. Van Hemel, *Barriers and stimuli for ecodesign in SMEs*. Journal of Cleaner Production, 2002.
17. Dowie, T.A., *A disassembly planning and optimisation methodology for design*. 1995, The Manchester Metropolitan University (United Kingdom),: Manchester.

18. Ehrenfeld, J. and M.J. Lenox, *The development and implementation of DfE programme*. The journal of sustainable product design, 1997. **1**: p. 17-27.
19. Fiksel, J., *Design for Environment, Creating Eco-Efficient Products and Processes*. 1996: McGraw-Hill, California. p. 95 p.
20. Halog, A., *Selection of sustainable product improvement alternatives*. 2002, University of Karlsruhe, Germany: Karlsruhe.
21. Janin, M., *Démarche d'éco-conception en entreprise, un enjeu: construire la cohérence entre outils et processus*. 2000, ENSAM: Chambéry, France.
22. Keoleian, G.A. and D. Menerey, *Life Cycle Design Guidance Manual - Environmental requirements and the product system*. 1993, US EPA.
23. Lee, K.M. and P.J. Park, *Ecodesign best practice of ISO/TR 14062*. 2005, Committee on trade and investment, APEC.
24. Puyou, J.B., *Démarches d'éco-conception en entreprise", Techniques de l'Ingénieur*. 1999, Techniques de l'Ingénieur, G6050.
25. Ventère, J.P., *Conception écologique des produits*. 1997, Techniques de l'Ingénieur G6 000.
26. Garlotta, D., *A literature review of poly(lactic acid)*. Journal of Polymers and the Environment, 2001. **9**: p. 63-84.
27. Gupta, A.P. and V. Kumar, *New emerging trends in synthetic biodegradable polymers Polylactide : A critique*. European polymer journal, 2007. **43**(10): p. 4053-4074.
28. Detzel, A. and M. Krüger, *Life Cycle Assessment of Polylactide: a comparison of food packaging made from NatureWorks PLA and alternative materials*. 2006, IFEU: Heidelberg.
29. Averous, L., *Biodegradable multiphase systems based on plasticized starch: a review*. Journal of macromolecular science, 2004.
30. Copinet, A., R. Gattin, and B. C, *Biodegradation study of a starch and poly(lactic acid) co-extruded material in liquid, composting and inert mineral media*. LWT - Food Science and Technology, 2001. **39**(6): p. 591-597.
31. Lovino, R., et al., *Biodegradation of poly(lactic acid)/starch/coir biocomposites under controlled composting conditions*. Polymer Degradation and Stability, 2008. **93**(1): p. 147-157.
32. Itavaara, M., S. Karjoma, and J.F. Selin, *Biodegradation of polylactide in aerobic and anaerobic thermophilic conditions*. Chemosphere, 2001. **46**(6).